



УДК 621.039

**МАТЕРИАЛЫ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ  
УКРЫТИЙ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ  
УСТРОЙСТВАМИ ИЯУ ИВВ-2М****MATERIALS OF RADIATION PROTECTION FOR  
SHELTERS FROM IONIZING RADIATION WHEN  
HANDLING EXPERIMENTAL DEVICES FOR A  
RESEARCH NUCLEAR FACILITY IVV-2M**

**Лукьяненко Вера Юрьевна**, студент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vera-lukyanenko@mail.ru. Тел.: +7(343) 375-97-37

**Ташлыков Олег Леонидович**, кан.-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

**Русских Иван Михайлович**, главный инженер, АО «Институт реакторных материалов», Россия, г. Заречный, а/я 29. Тел.: +7(343)773-50-04

**Vera U. Lukyanenko**, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vera-lukyanenko@mail.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

**Oleg L. Tashlykov**, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

**Ivan M. Russkih**, Chief Engineer, JSC «INM», Zarechny, Sverdlovsk region, Russia, P.O. Box # 29. E-mail: ivan\_russkih82@mail.ru. Тел.: +7(343)773-50-04

**Аннотация:** Приведено описание стендовой базы исследовательской ядерной установки ИВВ-2М. Продемонстрированы основные этапы жизненного цикла экспериментальных устройств, предназначенных для облучения в реакторе. Показана значимость оптимизации содержания компонентов радиационно-защитного материала, определяемого изотопным составом радиоактивных загрязнений, в зависимости от типа реакторной установки, продолжительности эксплуатации и других факторов. Описано применение алгоритма оптимизации на основе полученных результатов расчетного исследования ослабляющей способности однородных радиационно-защитных материалов с различными наполнителями по отношению к гамма-излучению.

**Abstract:** The description of the bench base of the research nuclear facility IVB-2M is given. The main stages of the life cycle of experimental devices intended for irradiation in a reactor are demonstrated. The importance of optimizing the content of the components of the radiation-protective material, determined by the isotopic composition of radioactive contamination, is shown, depending on the type of the reactor installation, the duration of operation, and other factors. The application of an optimization algorithm based on the results of a computational study of the attenuating power of homogeneous radiation-protective materials with various fillers relative to gamma radiation is described.

**Ключевые слова:** экспериментальный стенд, исследовательская ядерная установка, реакторные материалы, активация конструкционных материалов, остаточная радиоактивность, транспортно-технологическая операция, доза облучения, оптимизация радиационной защиты, источник  $\gamma$ -излучения, кратность ослабления, метод Монте Карло, однородный радиационно-защитный материал, затраты-выгода.

**Key words:** Experimental stand, nuclear research facility, reactor materials, activation of structural materials, residual radioactivity, transport-technological operation, dose of radiation, optimization of radiation protection, source of  $\gamma$ -radiation, multiplicity of attenuation, Monte Carlo method, homogeneous radiation-protective material, Cost-benefit.

## ВВЕДЕНИЕ

Обоснование работоспособности топлива различных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) и созданных на его основе топливных элементов (ТВЭЛОВ) невозможно без проведения радиационных испытаний. Для определения критериев надежности и безопасной эксплуатации ТВЭЛ, применяемых в активных зонах различного класса ЯЭУ, во всем мире используются исследовательские ядерные реакторы различного типа.

АО «ИРМ» эксплуатирует водо-водяной исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М (ИЯР ИВВ-2М), мощностью 15 МВт. Реактор ИВВ-2М является многофункциональным, то есть, предназначен для решения широкого круга задач, таких как:

- проведение реакторных испытаний материалов и конструкций ядерных энергетических установок в стационарных и маневренных режимах;
- проведение предреакторных и послереакторных материаловедческих исследований по определению служебных свойств материалов элементов и конструкций активных зон ядерных и термоядерных установок;
- проведение исследований по физике твердого тела;
- проведение аналитических исследований с использованием ядерно-физических методов;
- производство радиоактивных изотопов.

С целью проведения исследований и ресурсных испытаний техники специального назначения и различных реакторных материалов, включая топливные, входящие в состав перспективных видов греющих стержней на реакторе ИВВ-2М создана экспериментальная база для обеспечения заданных параметров при испытании экспериментальных устройств, которая обеспечивает в настоящее время облучение топливосодержащих элементов [1].

В состав экспериментальной базы входят стенды «ПУРС», «РИСК», «УРАЛ» и «РГС». Стенд «ПУРС» предназначен для вне реакторной подготовки и обеспечения ресурсных испытаний ЭГК в составе петлевых каналов. Стенд «РИСК» предназначен для обеспечения реакторных испытаний ТВЭЛОВ, макетов ТВЭЛОВ и топливных композиций ЯЭУ различного назначения в инертной газовой среде (гелий, неон, гелий-неоновая смесь). Стенд «УРАЛ» предназначен для проведения внутриреакторных испытаний

конструкционных материалов в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Стенд «РГС» предназначен для проведения испытаний экспериментальных сборок ТВЭЛОВ и электромеханических устройств в составе экспериментальных устройств (ЭУ).

## ОБРАЩЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Некоторые ЭУ включают объекты исследования (ОИ), содержащие в себе перспективные топливные материалы, их композиции и сборки (рис. 1). С этим связано присвоение всем работам, связанным с проведением транспортно-технологических операций с ЭУ, класса ядерно- и радиационно-опасных.

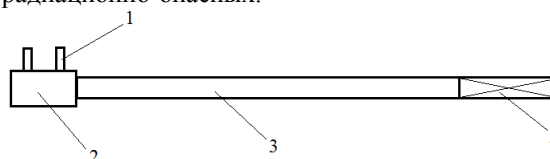


Рис. 1. Общий вид ЭУ: 1 – патрубки стыковки входных и выходных трубопроводов облучательного устройства с коммуникациями основного контура реакторного газового стенда, выход «сухого» канала, выход соединений КИП; 2 – «головка» устройства; 3 – корпус ЭУ; 4 – рабочий участок ЭУ

Транспортно-технологические операции (ТТО) с ЭУ, содержащим ОИ, приведены на рис. 2. Проведение ряда работ с ЭУ связано с повышенными дозовыми нагрузками технического персонала. Получение значительных доз внешнего облучения персоналом наиболее вероятно на этапах утилизации облучательного устройства после реакторных испытаний. Это обуславливается наличием в ЭУ облученных топливных материалов в зоне рабочего участка устройства, распространением продуктов деления топлива по всей высоте рабочих коммуникаций и активацией материалов, из которых выполнены элементы и корпус ЭУ. Несмотря на продолжительную выдержку устройства в кронштейне выдержки бака ИЯР ИВВ-2М, остаточное тепловыделение и активность продуктов деления и активации ОИ остается высокой.

В связи с этим возникает необходимость минимизации дозовых затрат персонала при выполнении работ с ЭУ после облучения в реакторе (транспортировка, частичная и полная разделка устройства, утилизация его как РАО).

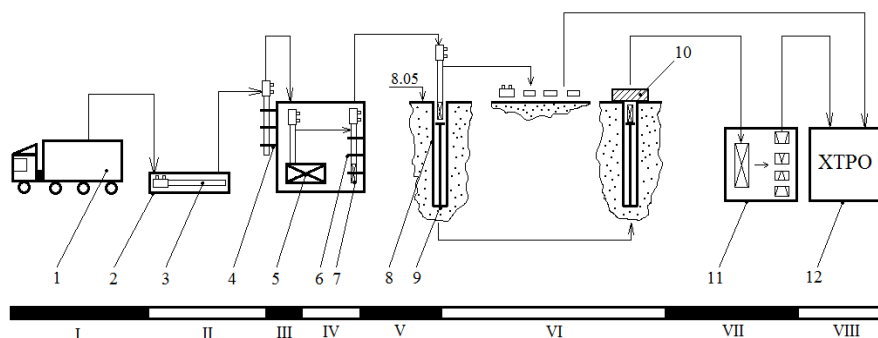


Рис. 2. Транспортно-технологические операции с ЭУ:

1 – автомобильный транспорт; 2 – ТУК; 3 – ЭУ; 4 – ступень входного контроля и пневмоиспытаний; 5 – активная зона ИЯР ИВВ-2М; 6 – кронштейн выдержки в баке ИЯР; 7 – рабочий участок ЭУ; 8 – «сухая» сборка; 9 – регулируемая подставка; 10 – блок свинцовой защиты; 11 – «горячая» камера резки КГ-2; 12 – хранилище твердых радиоактивных отходов.

I – выгрузка ЭУ из автотранспорта; II – транспортировка ЭУ на стойку входного контроля, входной контроль, пневмоиспытания ЭУ; III – транспортировка ЭУ в бак ИЯР ИВВ-2М, поэтапная загрузка в активную зону; IV – выгрузка ЭУ из активной зоны в кронштейн выдержки бака ИЯР; V – выгрузка ЭУ в «сухую» сборку с частичной разделкой (отделение рабочего участка); VI – разделка низкоактивной части ЭУ; VII – перегрузка высокоактивной части (рабочего участка) ЭУ из «сухой» сборки в «горячую» камеру резки КГ-2, разделка в камере; VIII – удаление РАО

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ

Оценка минимизации дозовых затрат персонала при проведении статичных ТТО с ЭУ выполнена расчетным методом. Рассчитаны кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения защитными материалами, которые потенциально возможно использовать в качестве мобильных укрытий при проведении работ по разделки ЭУ. Расчетные оценки кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения от рассматриваемых источников образцами защитных материалов проведены с использованием программного кода MCNP (*Monte Carlo N-Particle Transport Code*). MCNP является универсальной программой, реализующей метод Монте-Карло расчета переноса совокупности нейтронов, фотонов, электронов с непрерывной энергией в обобщенной геометрии и с зависимостью от времени. [2].

Расчетные модели включают в себя источник гамма-излучения, детектор гамма-излучения, заполненный материалом, близким по составу к человеческой ткани и защитный материал. Для расчетных оценок выбраны этапы V и VI (рис. 2) обращения с выработавшим свой ресурс в активной зоне ИЯР ИВВ-2М ЭУ.

Для проведения оценки эффективности мобильных укрытий с помощью расчетного кода, реализующего метод Монте-Карло, в качестве основного защитного материала использован РЗМ серии Абрис РЗ, разработанный специалистами ООО «Завод герметизирующих материалов» (Абрис РЗнк-01 (с содержанием солей бария 50 и

90%), Абрис РЗнк-02 (с содержанием свинца 50 и 80%), Абрис РЗнк-03 (с содержанием вольфрама 80%). РЗМ представляет собой гомогенную композицию на основе полимерного связующего, наполнителя, пластификатора и технологических добавок [3]. На рисунке 3 приведены результаты расчетной оценки зависимости кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения на детекторах от толщины защитного материала марки Абрис с наполнителем свинец.

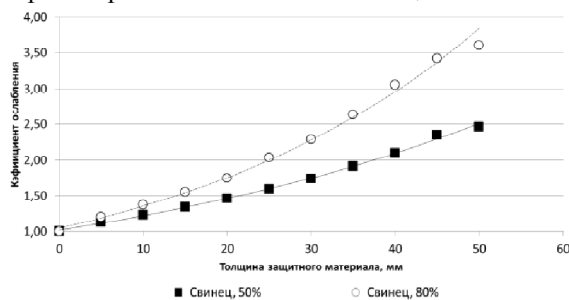


Рис. 3. Расчетные зависимости кратности ослабления мощности дозы  $\gamma$ -излучения на детекторе (на этапе V) от толщины защитного материала марки Абрис РЗнк-02 с наполнителем свинец

После выполнения вычислений были проведены оптимизационные расчеты оптимального варианта защиты, который зависит от того, сколько средств может быть затрачено, чтобы снизить коллективную дозу на 1 чел·мЗв. Для принятия решений в радиационной защите существует стандартное значение, известное как параметр «альфа» ( $\alpha$ ) – стоимость 1 чел·мЗв или денежный эквивалент единицы коллективной дозы. Его значение рекомендовано государственными

организациями, ответственными за радиационную защиту в каждой стране, либо устанавливается внутри организаций.

На рис. 4 приведены результаты оптимизации толщины радиационно защитного материала со свинцовым наполнителем с концентрацией 80% с использованием процедуры АЛАРА (метод «Затраты-выгода»). При этом стоимость 1 чел.-мЗв принята 30 долл. США (1800 руб) [4].

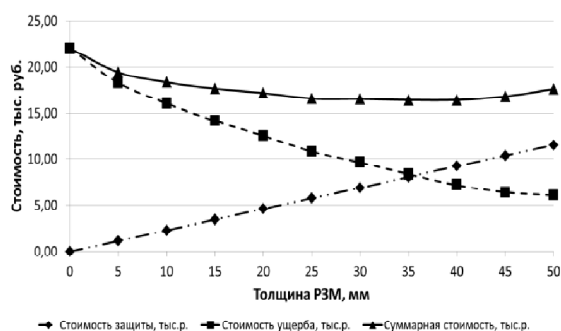


Рис. 4. Кривая анализа «Затраты - выгода» для защитного материала типа Абрис с содержанием свинца 80% от его толщины на этапе V при следующих условиях: время работы – 1 ч, кол-во работников – 5 чел., стоимость чел.-мЗв – 30\$

Как следует из графика, что оптимальным решением в данном случае является использование РЗМ в диапазоне толщин от 30 до 40 мм.

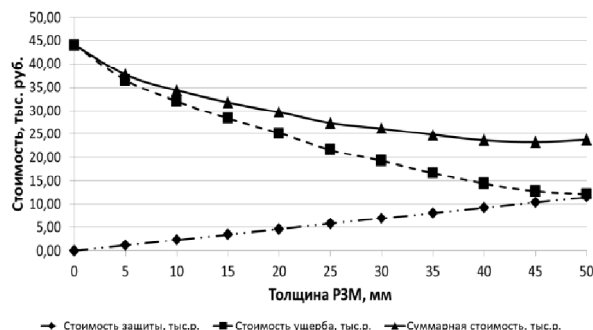


Рис. 5. Кривая анализа «Затраты - выгода» для защитного материала типа Абрис с содержанием свинца 80% от его толщины на этапе V при следующих условиях: время работы – 2 ч, кол-во работников – 5 чел., стоимость чел.-мЗв – 30\$

На рисунке 5 показан анализ «Затраты-выгода» для производственной ситуации, схожей с ситуацией, рассмотренной на рисунке 9, с одним различием – время производства работ увеличилось до 2 часов. Оптимум применения свинецсодержащего РЗМ с концентрацией свинца 80% смещается в сторону увеличения толщины защиты – 45 мм, а вклад стоимости РЗМ в суммарную стоимость становится гораздо менее значительным, что позволяет применять более

дорогостоящие и эффективные защитные материалы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты, выполненные с использованием высокопрецизионного расчетного кода, реализующего метод Монте-Карло, показывают хорошую сходимость полученных результатов с экспериментальными данными [5], что позволяет определять состав поглотителей для ситуаций планируемого облучения. Материалы типа Абрис показывают хорошие расчетные характеристики применительно к работам, проводимым в АО «ИРМ», как следствие существует большой потенциал их использования в ряде случаев. Полученные расчетные данные позволяют реализовать методологию принципа ALARA на примере концепции «Затраты - Выгода» с достаточной степенью точности, обеспечивая экономическую эффективность использования материалов типа Абрис.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафонов В.А., Кощеев К.Н., Токарев В.И., Чеботков В.А., Ивонин В.Н., Животов С.А. Реакторные стенды и установки для проведения испытаний топлива в реакторе ИВВ-2М. Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы в 21 веке» 20-23 июня 2006г. М.: НИКИЭТ.
2. Briesmeister, Ed. A General Monte Carlo N – Particle Transport code. Los Alamos National Laboratory report, LA-12625-M, Version 4B, 1997.
3. Савченкова Г.А., Артамонова Т.А., Савченков В.П., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Перспективы использования материалов серии Абрис для радиационной защиты персонала АЭС / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Сборник докладов восьмой международной научно-технической конференции. М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – С.504-508
4. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. – 232 с.
5. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 2 (15). – С. 49-55.